# 跑鞋纵向抗弯刚度调整对青少年下肢生物力学影响的研究

叶靖怡[1],陈海荣[1],宋杨[1,2],孙冬[1],顾耀东[1]

(1. 宁波大学体育学院,315211 宁波;2. 塞格德大学工程学院,H9700 塞格德,匈牙利)



**摘　要**:探讨青少年跑者在不同纵向抗弯刚度(longitudinal bending stiffness,LBS)跑鞋条件下进行跑步运动时的下肢生物力学参数变化。选取10名有一定训练基础的约13周岁青少年跑者,年龄(13.5±0.6)岁;身高(166.3±1.9)cm;体质量(50.8±3.1)kg;足长(25.4±0.2)cm,分别选用3种LBS不同的跑鞋(低刚度鞋:5.0 N·m;中刚度鞋:6.3 N·m;高刚度鞋:8.6 N·m)进行跑步运动生物力学综合测试,通过VICON三维运动捕捉系统和AMTI三维测力台同步采集受试者下肢反光标记点轨迹和地面反作用力,分析比较不同LBS跑步支撑期的下肢关节角度、峰值力矩、关节功率和做功变化。在3种不同LBS条件下,中刚度鞋和高刚度鞋的髋关节屈伸活动度显著小于低刚度鞋;高刚度鞋的跖趾关节屈伸活动度显著小于低刚度鞋与中刚度鞋;矢状面上,中刚度鞋和高刚度鞋的髋关节峰值力矩显著小于低刚度鞋;低刚度鞋与中刚度鞋的踝关节峰值力矩显著小于高刚度鞋;中刚度鞋和高刚度鞋的跖趾关节峰值力矩显著小于低刚度鞋。中刚度鞋和高刚度鞋髋关节做正功和负功显著小于低刚度鞋;中刚度鞋和高刚度鞋膝关节做正功显著小于低刚度鞋;低刚度鞋膝关节做负功显著大于中刚度鞋;中刚度鞋和高刚度鞋踝关节做正功和负功显著大于低刚度鞋。随着跑鞋LBS增加,青少年跑者伸髋角度、峰值力矩、关节做功减小,踝关节跖屈角度减小、关节做功增大,跖趾关节屈曲活动度和峰值力矩降低。恒定跑速下,随着鞋具LBS调整,下肢做功在不同关节间出现转移与重新分布。青少年跑者不同LBS的下肢运动生物力学参数可能为跑鞋LBS设计与优化提供科学参考。

**关键词**:跑鞋;纵向抗弯刚度(LBS);青少年;下肢生物力学

**中图分类号**:G804.6　　　　**文献标志码**:A

# Effects of running shoes' increased longitudinal bending stiffness on lower limb biomechanics of adolescent runners

YE Jingyi[1], CHEN Hairong[1], SONG Yang[1,2], SUN Dong[1], GU Yaodong[1]

(1. Faculty of Sports Science, Ningbo University, 315211 Ningbo, China;
2. Faculty of Engineering, University of Szeged, H9700 Szeged, Hungary)

**Abstract**: To investigate the biomechanical parameters of the lower limbs of adolescent runners under different longitudinal bending stiffness (LBS) running shoe conditions. Ten adolescent runners [age

**收稿日期**:2022-02-28　　　**修回日期**:2022-03-25

**基金项目**:浙江省重点研发计划资助(No. 2021C03130);浙江省杰出青年科学基金资助(No. LR22A020002);宁波市公益类科技计划资助(No. 2021S134);宁波大学省属高校基本科研业务费项目资助(No. SJWY2022014);宁波大学教研重点项目资助(No. JYXMXZD2022008)

**通信作者**:顾耀东,教授。E-mail: guyaodong@nbu.edu.cn

**引用格式**:叶靖怡,陈海荣,宋杨,等. 跑鞋纵向抗弯刚度调整对青少年下肢生物力学影响的研究[J]. 应用力学学报,2022,39(2):209-217.

YE Jingyi, CHEN Hairong, SONG Yang, et al. Effects of running shoes' increased longitudinal bending stiffness on lower limb biomechanics of adolescent runners[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(2): 209-217.

(13.5 ±0.6) years; height (166.3 ±1.9) cm; body mass (50.8 ±3.1) kg; foot length (25.4 ±0.2) cm] with some training experience were selected to run in three different longitudinal bending stiffness shoes (low-stiffness shoe: 5.0 N·m; medium-stiffness shoe: 6.3 N·m; and high-stiffness shoe: 8.6 N·m). The VICON 3D motion capture system and AMTI 3D force measuring platform were used to collect the trajectories of the lower limb marker points and ground reaction forces simultaneously and to analyze and compare the changes in joint angles, peak moments, joint power, and work done at different longitudinal flexural stiffness. Under the three different bending stiffness conditions, the hip joint mobility in medium- and high-stiffness shoes was significantly less than that in low-stiffness ones; the metatarsophalangeal joint mobility in high-stiffness shoes was significantly less than that in low- and medium-stiffness ones. On the sagittal plane, the peak hip joint moment in medium- and high-stiffness shoes was significantly less than that in low-stiffness ones; peak ankle joint moments were significantly smaller in low- and medium-stiffness shoes than in high-stiffness ones; peak metatarsophalangeal joint moments were significantly smaller in medium- and high-stiffness shoes than in low-stiffness ones; The positive and negative hip joint work of medium- and high-stiffness shoes was significantly less than the low-stiffness ones. The negative knee joint work of low-stiffness shoes was significantly higher than that of medium-stiffness ones. The positive and negative ankle joint work in medium- and high-stiffness shoes was significantly higher than that of low-stiffness ones. As the LBS of running shoe increases, hip extension angle, peak torque and joint work decrease, ankle plantarflexion angle decreases, joint work increases, and metatarsophalangeal joint flexion range of motion and peak torque decreases. At a constant running speed, with the adjustment of the shoe LBS, the work of the lower limbs is transferred and redistributed among different joints. The biomechanical parameters of lower extremity movement of young runners with different LBS may provide scientific reference for the design and optimization of running shoe LBS.

**Key words**: running shoes; longitudinal bending stiffness (LBS); adolescent; lower limb biomechanics



跑步因其实用性和经济性成为最受欢迎的体育运动之一。参与跑步的人数呈逐年递增趋势，其中不乏青少年跑者的参与。近期，碳板跑鞋也逐渐应用于青少年跑者群体。通过碳板的加持增加跑鞋的纵向抗弯刚度(longitudinal bending stiffness, LBS)，可能会引起人体一系列跑步生物力学变化。Ortega 等[1]指出跑鞋 LBS 增加对跖趾关节(metatarsophalangeal joint, MTPJ)和踝关节的生物力学表现影响最大。例如跖趾关节跖屈角度减小，地面反作用力(ground reaction forces, GRFs)的作用点向前移动，下肢关节矢状面地面反作用力的力臂增加等[2-5]。人体运动学和动力学的特征变化可能会影响跑步经济性和能量消耗[6]。关于碳板跑鞋在跑步经济性方面的研究出现了不同的结果，因其中机制还没有完全了解，所以此次研究未将跑步经济性因素纳入在内。以往研究显示，通过降低跑步时跖趾关节屈曲，增加鞋具 LBS 可能有降低跖骨负荷、预防跖骨应力过载的作用，鞋具的 LBS 调整可能对运动表现和损伤风险产生影响[7]。早期研究聚焦足部能量学[8]，而近期研究则聚焦在改变足部压力中心运动和踝关节传动比的重要性方面[5]。研究表明，鞋具 LBS 的最优化可能会帮助跑者提升运动表现。

肌骨等生物组织的力学特性也会影响跑步时的生物力学表现以及能量消耗[9]。Nudel 等[10]研究发现影响青少年跑步的因素与其最大摄氧量下的血乳酸水平、骨龄成熟度和身体协调性有关。青少年正处于生长发育关键期，在关节软骨、骨骺处纵向生长较快，长骨增粗增宽[11]。在青少年快速发育期间，骨骼生长速度可能会超过肌肉和肌腱的延长速度，出现“不匹配”现象。成年跑者的左右下肢力量基本对称，腘绳肌与股四头肌在下肢肌肉占比更高[12]。与成人相比，青少年跑者肌肉力量较弱，关节松弛程度与肌腱柔韧性通常更高[13]。具有碳板加持、纵向抗弯刚度提升的跑鞋可能会在一定程度上稳定青少年跑步姿态。但是，碳板材质因素也可能会增大青少年跑者着地冲击，对跑步技术和肌骨发育尚未成熟的青少年跑者来说，可能造成损伤风险的增大。以往研究多关注成年跑者[14]，而针对青少年跑者的研究较少，在使用不同 LBS 跑鞋进行跑步训练时，青少年的下肢生物力学调整机理仍不清楚。

随着青少年跑者人数增加和运动水平提升，对跑鞋的功能性需求也越来越高[15]。因此，本研究尝试在 3 种抗弯刚度跑鞋条件下，测试青少年跑者跑步支撑期的运动学与动力学参数，探究青少年跑者在不同抗弯刚度跑鞋条件的下肢生物力学变化，以期用科学的运动生物力学研究为青少年跑鞋设计优化提供支撑。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

本研究招募有一定跑步训练基础的青少年跑者 10 名，鞋码要求为 41 码，右侧为优势侧，且近 3 年内均不存在下肢神经-肌肉-骨骼损伤史[16]。运用 G power（Erdfelder, Faul, & Buchner, 1996）计算本次实验所需的样本量[17]；同时，根据 Traiperm 等[18]提出青少年跑者选取“13 周岁且 1 周内进行跑步训练的里程不低于 16 km”的要求，将受试者范围要求为：13 周岁左右，近两年来一直在接受规范的有氧训练，且在近一个月内进行超过 70 km 的跑步训练。详细告知整个实验流程，并签署知情协议书[19]。受试者年龄、身高、体质量基本情况的数据描述性分析结果为：年龄（13.5 ± 0.6）岁；身高（166.3 ± 1.9）cm；体质量（50.8 ± 3.1）kg；足长（25.4 ± 0.2）cm。



### 1.2 跑鞋纵向抗弯刚度

选取跑鞋如表 1 所示，通过 3 点弯曲测试，测量了该鞋具弯曲形变对应的抗弯载荷，由此计算 LBS 均值范围，换算为鞋具抗弯力矩。通过测量得出鞋具 LBS 的具体数值为：5.0 N·m（低刚度鞋）、6.3 N·m（中刚度鞋）和 8.6 N·m（高刚度鞋）。除添加碳板导致跑鞋 LBS 不同外，跑鞋的其他构造如大底构造与材料、鞋面和鞋带设计等保持完全一致[1]。

**表 1 不同刚度实验跑鞋**

Tab. 1 List of experimental running shoes

| 低刚度鞋 5.0 N · m | 中刚度鞋 6.3 N · m | 高刚度鞋 8.6 N · m |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

### 1.3 实验方法

使用 VICON MX 运动分析系统（Oxford Metrics Ltd, Oxford, UK），捕获三维反光标记点轨迹坐标，该系统包含 8 个摄像头，采样频率为 200 Hz[20-21]。根据人体体表标志点放置 14 mm 的反射标记[22]，如图 1 所示。使用 600 mm × 400 mm 三维测力台（AMTI, Watertown, MA, USA）以 1 000 Hz 的采样频率同步收集跑步支撑期 GRF 参数[23]。

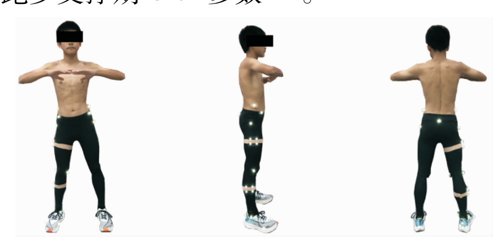


图 1 下肢运动学模型

Fig. 1 Lower limb kinematics model

受试者首先进行 10 min 热身跑并适应实验环境。随后要求受试者以 3.3 m/s 的速度进行实验测试[24]。使用 Brower 计时设备（Brower Timing System, Draper, UT, USA）记录跑步速度，该设备位于距测力台中心 1.2 m 处[25]。要求受试者跑姿自然，支撑期内右足完全踏在测力台范围内，且与设定速度的误差在 5% 以内视为一次成功的采集，每位受试者采集不少于 8 次成功数据。

### 1.4 数据处理与分析

本研究重点分析跑步支撑期（stance phase），即右足跟着地到右足趾离地这一时期。Vicon Nexus 软件生成 C3D 文件，导入至 Visual 3D 人体建模仿真软件（C-motion Inc., Germantown, MD, USA）的定制函数模块来处理和量化踝关节、膝关节和髋关节跑步支撑期的运动学变量[26-27]。运动学数据通过 10 Hz 四阶 0 相位低通巴特沃斯滤波器进行滤波，用于标记轨迹的去噪过程[28]。关节角度（踝关节、髋关节、膝关节和跖趾关节）使用矢状面万向角进行计算[29]。标准逆向动力学方法（inverse dynamics）用于计算关节力矩和关节功率，同时计算关节做功，关节动力学数据均根据受试者的体质量进行标准化[30]。通过 Matlab 2019b（The Math Works, Natick, MA, USA）将关节运动学和动力学参数标准化为 101 个数据点[31]。

### 1.5 统计学方法

应用 SPSS 26.0 软件处理数据，实验所得数据均采用均值 ± 标准差表示，采用单因素重复测量方差分析法，事后检验采用 Bonferroni 法进行比较，$P < 0.05$ 为差异具有统计学意义[32]。

## 2 研究结果

### 2.1 运动学研究结果

3 种 LBS 下肢各关节矢状面活动度(range of motion,ROM)测试结果如表 2 和图 2 所示。髋关节:Greenhouse & Geisser 的校正结果显示,不同 LBS 鞋具的关节活动度差异具有统计学意义($F$ = 70.523,$P$ < 0.05);事后检验结果两两比较,低刚度鞋与中刚度鞋有显著性差异($P$ < 0.001);低刚度鞋与高刚度鞋有显著性差异($P$ < 0.001)。低刚度鞋与中刚度鞋的 95% 置信区间为 6.68° ~ 10.66°;低刚度鞋与高刚度鞋的 95% 置信区间为 5.42° ~ 11.08°。跖趾关节:整体分析知,经球型性检验后整体分析在关节活动度上无显著性意义($F$ = 10.540,$P$ > 0.05);事后检验结果两两比较,低刚度鞋与高刚度鞋有显著性差异($P$ = 0.01);中刚度鞋和高刚度鞋有显著性差异($P$ = 0.001)。低刚度鞋与高刚度鞋的 95% 置信区间为 2.80° ~ 21.21°;中刚度鞋和高刚度鞋的 95% 置信区间为 6.94° ~ 26.69°。

**表 2 3 种 LBS 下肢各关节矢状面活动度(单位:(°))**

Tab. 2 Sagittal range of motion of lower extremity joints in three types of LBS(Unit:(°))

| 关节 | 低刚度鞋 | 中刚度鞋 | 高刚度鞋 |
|---|---|---|---|
| 髋 | 42.69 ± 3.52[bc] | 33.66 ± 1.02[a] | 33.78 ± 2.16[a] |
| 膝 | 29.60 ± 8.10 | 30.41 ± 6.30 | 32.19 ± 6.57 |
| 踝 | 44.37 ± 3.17 | 43.13 ± 3.27 | 42.11 ± 3.59 |
| 跖趾 | 54.14 ± 7.01[c] | 58.94 ± 7.69[c] | 37.79 ± 7.09[ab] |

注:[a] 表示与低刚度鞋有显著性差异;[b] 表示与中刚度鞋有显著性差异;[c] 表示与高刚度鞋有显著性差异。

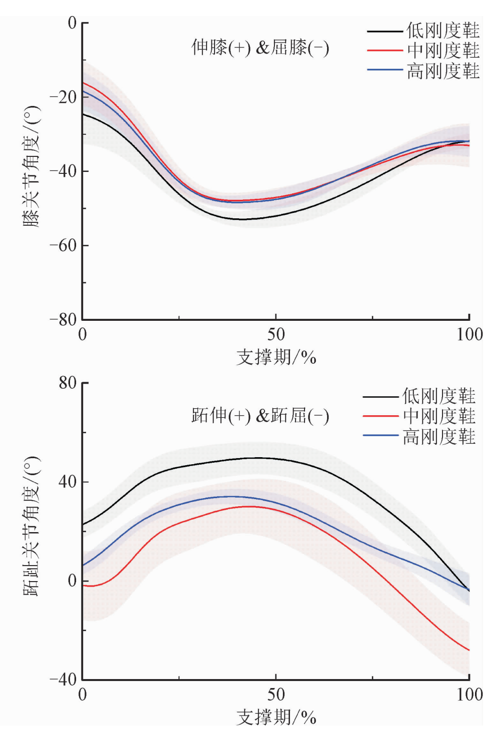



图 2 下肢各关节支撑期的关节角度(平均值 ± 标准差)

Fig. 2 The joint angle of each joint of lower extremities during the support period (mean ± standard deviation)

### 2.2 动力学研究结果

3 种抗弯刚度条件下,下肢各关节矢状面峰值力矩测试结果如表 3 和图 3 所示。髋关节:整体分析知,经球型检验后,髋关节峰值力矩无显著性意义($F$ = 10.160,$P$ > 0.05);事后检验结果两两比较,低刚度鞋与中刚度鞋有显著性差异($P$ = 0.022);低刚度鞋与高刚度鞋有显著性差异($P$ = 0.001)。低刚度鞋与中刚度鞋的 95% 置信区间为 0.05 N·m/kg ~ 0.69 N·m/kg;低刚度鞋与高刚度鞋的 95% 置信区间为 0.18 N·m/kg ~ 0.72 N·m/kg。踝关节:经球型检验后,整体分析在踝关节上的峰值力矩上无显著性意义($F$ = 14.255,$P$ > 0.05);事后检验结果两两比较,低刚度鞋与高刚度鞋有显著性差异($P$ < 0.001);中刚度鞋和高刚度鞋有显著性差异($P$ = 0.042)。低刚度鞋与高刚度鞋的 95% 置信区间为

0.18 N·m/kg ~ 0.47 N·m/kg；中刚度鞋和高刚度鞋的95%置信区间为0 N·m/kg ~ 0.30 N·m/kg。跖趾关节：Greenhouse & Geisser 的校正结果显示不同的 LBS 鞋具在跖趾关节峰值力矩上的差异具有统计学意义（$F = 27.708$，$P < 0.05$）；事后检验结果两两比较，低刚度鞋与中刚度鞋有显著性差异（$P = 0.01$）；低刚度鞋与高刚度鞋有显著性差异（$P < 0.001$）；中刚度鞋和高刚度鞋有显著性差异（$P = 0.034$）。低刚度鞋与中刚度鞋的 95% 置信区间为 0.13 N·m/kg ~ 0.48 N·m/kg；低刚度鞋与高刚度鞋的 95% 置信区间为 0.42 N·m/kg ~ 0.76 N·m/kg；中刚度鞋和高刚度鞋的 95% 置信区间为 0.02 N·m/kg ~ 0.56 N·m/kg。

**表 3　3 种 LBS 下肢各关节矢状面关节力矩（单位：N·m/kg）**

Tab. 3　Sagittal joint moment of each joint of lower extremities in three LBS（Unit：N·m/kg）

| 关节 | 低刚度鞋 | 中刚度鞋 | 高刚度鞋 |
| --- | --- | --- | --- |
| 髋 | $3.55 \pm 0.46^{bc}$ | $3.19 \pm 0.32^{a}$ | $3.10 \pm 0.29^{a}$ |
| 膝 | $1.77 \pm 0.34$ | $1.85 \pm 0.27$ | $1.77 \pm 0.21$ |
| 踝 | $3.33 \pm 0.35^{c}$ | $3.16 \pm 0.54^{c}$ | $3.01 \pm 0.46^{ab}$ |
| 跖趾 | $-0.41 \pm 0.06^{bc}$ | $-0.38 \pm 0.08^{ac}$ | $-0.34 \pm 0.04^{ab}$ |

注：a 表示与低刚度鞋有显著性差异；b 表示与中刚度鞋有显著性差异；c 表示与高刚度鞋有显著性差异。

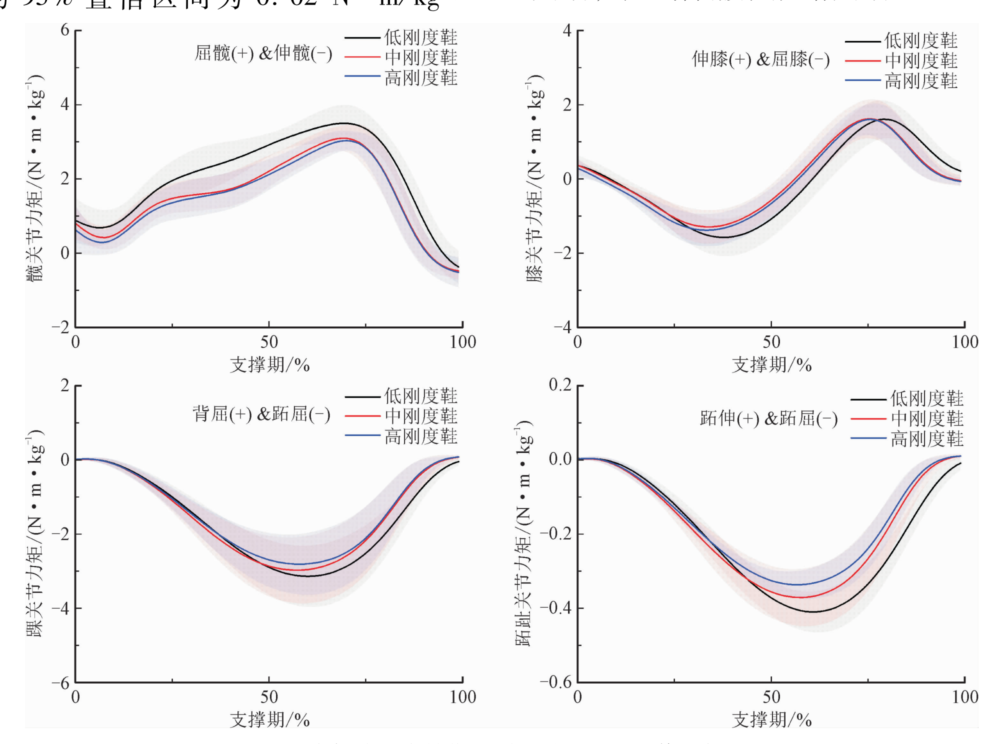



图 3　下肢各关节支撑期的关节力矩（平均值 ± 标准差）

Fig. 3　Joint moment of each joint of lower extremities during support period（mean ± standard deviation）

3 种抗弯刚度条件下，下肢各关节矢状面上的关节能量学做功参数结果如表 4、表 5 和图 4 所示。在做正功时，髋关节：经球型检验后，整体分析髋关节做正功时无显著性差异（$F = 171.842$，$P > 0.05$）；事后检验结果两两比较，低刚度鞋与中刚度鞋有显著性差异（$P < 0.001$）；低刚度鞋与高刚度鞋有显著性差异（$P < 0.001$）。低刚度鞋与中刚度鞋的 95% 置信区间为 1.19 J/kg ~ 1.74 J/kg；低刚度鞋与高刚度鞋的 95% 置信区间为 1.18 J/kg ~ 1.65 J/kg。膝关节：Greenhouse & Geisser 的校正结果显示不同 LBS 鞋具下膝关节做正功时的差异具有统计学意义（$F = 31.398$，$P < 0.05$）；事后检验结果两两比较，低刚度鞋与中刚度鞋有显著性差异（$P < 0.001$）；低刚度鞋与高刚度鞋有显著性差异（$P < 0.001$）。低刚度鞋与中刚度鞋的 95% 置信区间为 0.05 J/kg ~ 0.11 J/kg；低刚度鞋与高刚度鞋的 95% 置信区间为 0.03 J/kg ~ 0.10 J/kg。踝关节 Greenhouse & Geisser 的校正结果显示不同 LBS 鞋具下踝关节做正功时的差异具有统计学意义（$F = 22.735$，$P < 0.05$）；事后检验结果两两比较，低刚度鞋与中刚度鞋有显著性差异（$P < 0.001$）；低刚度鞋与高刚度鞋有显著性差异（$P = 0.001$）。低刚度鞋与中刚度鞋的 95% 置信区间为 0.21 J/kg ~ 0.54 J/kg；低刚度鞋与高刚度鞋的 95% 置信区间为 0.17 J/kg ~ 0.62 J/kg。

在做负功时，髋关节 Greenhouse & Geisser 的校正结果显示不同 LBS 鞋具髋关节做负功时的差异具有统计学意义（$F = 17.619$，$P < 0.05$）；事后检验发现，低刚度鞋与中刚度鞋有显著性差异（$P = 0.006$）；低刚度鞋与高刚度鞋有显著性差异（$P = 0.01$）。低刚度鞋与中刚度鞋的 95% 置信区间为 0.02 J/kg ~ 0.08 J/kg；低刚度鞋与高刚度鞋的 95% 置信区间为 0.01 J/kg ~ 0.08 J/kg。膝关节：经球型检验后，整体分析在膝关节做负功时无显著性意义（$F = 17.930$，$P > 0.05$）；事后检验结果两两比较，低刚度鞋与中刚度鞋有显著性差异（$P < 0.001$）；中刚度鞋与高刚度鞋有显著性差异（$P = 0.001$）。低刚度鞋与中刚度鞋的 95% 置信区间为 0.11 J/kg ~ 0.38 J/kg；中刚度鞋与高刚度鞋的 95% 置信区间为 0.09 J/kg ~ 0.35 J/kg。踝关节：经球型检验后，整体分析在踝关节做负功时无显著性差异（$F = 25.968$，$P > 0.05$）；事后检验结果两两比较，低刚度鞋与中刚度鞋有显著性差异（$P < 0.001$）；低刚度鞋与高刚度鞋有显著性差异（$P < 0.001$）。低刚度鞋与中刚度鞋的 95% 置信区间为 0.06 J/kg ~ 0.18 J/kg；低刚度鞋与高刚度鞋的 95% 置信区间为 0.11 J/kg ~ 0.26 J/kg。

**表 4　3 种 LBS 下肢各关节矢状面做正功（单位：J/kg）**

Tab. 4　Positive work done on sagittal plane of lower extremities with three kinds of LBS (Unit：J/kg)

| 关节 | 低刚度鞋 | 中刚度鞋 | 高刚度鞋 |
|---|---|---|---|
| 髋 | $3.01 \pm 0.47^{bc}$ | $2.66 \pm 0.36^{a}$ | $2.63 \pm 0.28^{a}$ |
| 膝 | $0.11 \pm 0.06^{bc}$ | $0.08 \pm 0.02^{a}$ | $0.06 \pm 0.02^{a}$ |
| 踝 | $1.01 \pm 0.25^{bc}$ | $1.26 \pm 0.15^{a}$ | $1.37 \pm 0.18^{a}$ |
| 跖趾 | $1.30 \pm 0.16$ | $1.26 \pm 0.16$ | $1.23 \pm 0.23$ |

注：[a] 表示与低刚度鞋有显著性差异；[b] 表示与中刚度鞋有显著性差异；[c] 表示与高刚度鞋有显著性差异。

**表 5　3 种 LBS 下肢各关节矢状面做负功（单位：J/kg）**

Tab. 5　Negative work done on sagittal plane of each joint of lower extremities in three kinds of LBS (Unit：J/kg)

| 关节 | 低刚度鞋 | 中刚度鞋 | 高刚度鞋 |
|---|---|---|---|
| 髋 | $0.07 \pm 0.03^{bc}$ | $0.06 \pm 0.02^{a}$ | $0.03 \pm 0.01^{a}$ |
| 膝 | $0.85 \pm 0.34^{b}$ | $0.76 \pm 0.23^{a}$ | $0.82 \pm 0.32$ |
| 踝 | $0.46 \pm 0.15^{bc}$ | $0.62 \pm 0.17^{a}$ | $0.67 \pm 0.10^{a}$ |
| 跖趾 | $0.73 \pm 0.19$ | $0.70 \pm 0.20$ | $0.68 \pm 0.07$ |

注：[a] 表示与低刚度鞋有显著性差异；[b] 表示与中刚度鞋有显著性差异；[c] 表示与高刚度鞋有显著性差异

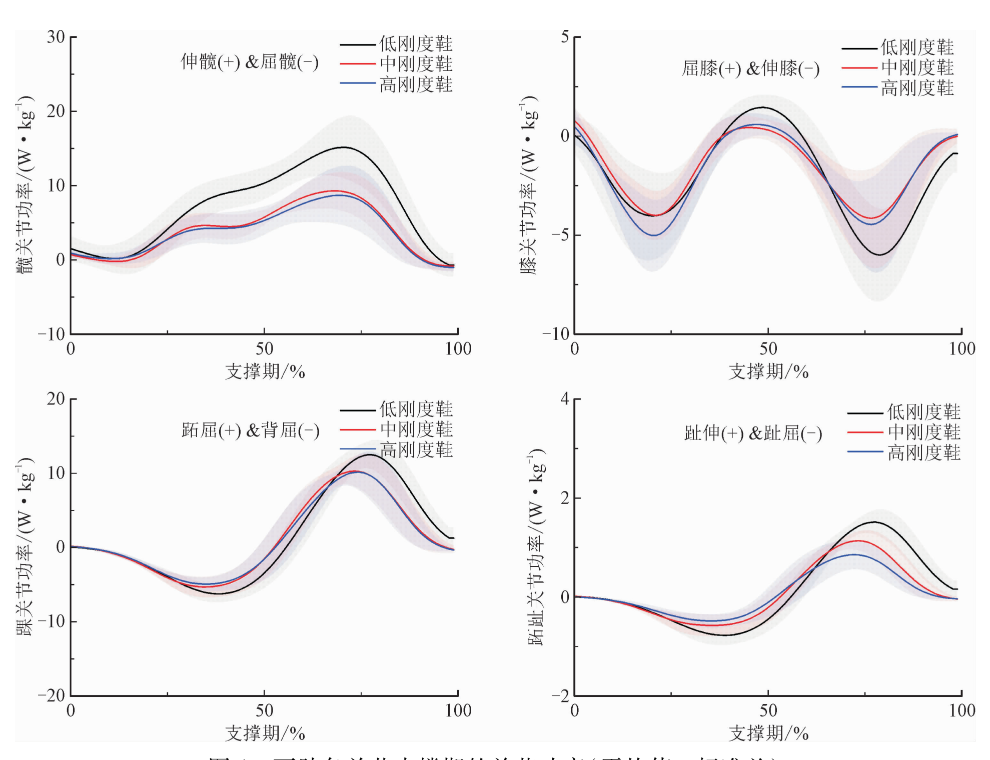



图 4　下肢各关节支撑期的关节功率（平均值 ± 标准差）

Fig. 4　The joint power of each joint of lower extremities during the support period (mean ± standard deviation)

实验室恒定跑速下，穿着低刚度、中刚度和高刚度跑鞋下肢关节做正功及负功总量无显著性差异，经与受试者体质量标准化后，穿着低刚度跑鞋下肢各关节正负功总量为（7.54 ± 0.44）J/kg，穿着中刚度跑鞋下肢各关节正负功总量为（7.40 ± 0.38）J/kg，穿着高刚度跑鞋下肢各关节正负功总量为（7.49 ± 0.41）J/kg。

进一步计算下肢各关节的做功贡献占比(各关节做功/下肢关节总功×100%),穿着低刚度跑鞋跖趾关节正功占比为(1.72±0.67)%,穿着中刚度跑鞋跖趾关节正功占比为(1.68±0.26)%,穿着高刚度跑鞋跖趾关节正功占比为(1.68±0.33)%。穿着低刚度跑鞋跖趾关节负功占比为(0.97±0.31)%,穿着中刚度跑鞋跖趾关节负功占比为(0.95±0.45)%,穿着高刚度跑鞋跖趾关节负功占比为(0.91±0.28)%。穿着低刚度跑鞋踝关节正功占比(13.40±1.83)%相比于高刚度跑鞋显著降低(18.29±1.26)%,$P=0.002$。恒定跑速下,相比于穿着较高抗弯刚度跑鞋,较低抗弯刚度的跑鞋能够降低踝关节做正功比例,而跖趾关节做功比例无显著差异。从以上结果可发现跑鞋 LBS 调整后,下肢不同关节做功分布发生了调整和转移。

## 3 讨 论

本研究为探究跑鞋 LBS 调整对青少年跑者下肢生物力学的影响,穿着不同碳板刚度的跑鞋完成跑步动作时,在支撑期内,跖趾关节的活动度与峰值力矩发生改变。有研究发现鞋中底硬度的改变(硬度:无支撑片,55~60 A 支撑片,75~80 A 支撑片)会导致青少年在跑步时髋关节角度变小(57.60°±10.88°)~(51.50°±11.38°)[22],与本文实验结果相匹配。Beltran 等[9]学者研究发现老年跑者在鞋类 LBS 改变时,髋关节峰值力矩减小。同样,以往研究表明髋关节在鞋具抗弯刚度改变后做的正功也会明显下降(19.05±7.61)%~(18.02±6.98)%[33]。虽然研究的人群不同,但与本研究得出的结果趋势相同,有一定的参考意义。在膝关节做负功方面,上述研究(6.80±4.43)%~(7.23±4.01)%[33]与本次研究结果不符。结果表明,随着 LBS 增加,青少年跑者髋关节屈髋的做功增加。这可能是因为青少年屈髋肌群如(股直肌、髂肌、腰大肌等)肌力不足,在 LBS 增加后,鞋具本身的回弹性能不足,需要屈髋肌群做更多功来维持原先的屈髋水平,维持刚度改变对跑步姿态的影响。

文献[34]中发现随着跑鞋纵向抗弯刚度(低刚度、中刚度、高刚度)的提升,下肢做正功比率由近端关节向远端关节调整分布。以往研究与此次研究的结果一致,膝关节做功时可能会因 LBS 增加而增加(正功:(16.52±4.48)%~(17.85±4.93)%;负功:(44.49±10.10)%~(46.23±9.35)%)[33]。以此为参考,研究发现在青少年跑者群体中,跑步支撑期时膝关节会减少做正功,这可能是由于 LBS 增加,关节做功重新分配。但研究发现,青少年跑者在穿着中刚度鞋(6.3 N·m)时,膝关节做负功减小;在穿着高刚度鞋(8.6 N·m)时,膝关节做的负功又回到之前水平。这可能是因为在某合适的刚度范围内,增加了关节的传动作用(gearing ratio)。以往研究发现 LBS 的增加会导致关节杠杆臂转移到下肢更靠远端的位置[5],使得膝关节在伸膝时做功更小。有研究表明,高 LBS 的鞋具缓冲性能可能较弱,需要更大的膝关节屈曲程度作为代偿[35],所以在穿着高 LBS 跑鞋时,膝关节伸膝的做功又恢复到之前的水平。证明如同笔者推测:青少年跑者群体在低刚度鞋(5.0 N·m)与中刚度鞋(6.3 N·m)之间可能存在较为适宜的 LBS,而高刚度鞋(8.6 N·m)的 LBS 可能不适宜青少年跑者群体,可能影响下肢部分关节应力增大,肌肉与关节做功增加,相关运动损伤风险可能升高。

研究发现,青少年跑者在穿着抗弯刚度增大的中刚度鞋(6.3 N·m)和高刚度鞋(8.6 N·m)时,踝关节背屈增大,峰值力矩减小。这与之前研究显示的增加 LBS 会减小儿童在跑步时踝关节的背屈角度最大值(39.64°±1.17°)~(41.42°±9.50°)不一致[22]。合理推测可能因为青少年跑者因为相关肌群(胫骨前肌、腓肠肌和比目鱼肌等)未发育成熟,关节的柔韧度与松弛程度较成年人高,跑姿尚未固定,可塑性较强,踝关节在鞋具 LBS 增加后适应性的调整了背屈的角度。峰值力矩的减小与前人研究结果吻合度较高,减小了踝关节的内旋,可能会在一定程度上适应背屈角度的改变减少踝关节受伤的风险[36]。但同时以往的研究发现踝关节受限可能会导致小腿肌群更易疲劳[37],结合本研究发现,在低刚度和中刚度之间或许存在适宜青少年跑者的跑鞋 LBS 范围,可能使踝关节更少的受限并且有利于青少年跑者下肢肌群的发展,降低运动损伤的风险。

Stefanyshyn 等[38]在研究中发现,由于跑鞋 LBS 增加(0.04 N·m~0.38 N·m),跖趾关节弯曲刚度增加,可减少在该关节处的能量损失,从而相应地提高运动表现。以往研究表明,在达到最大屈曲程度时跖趾关节刚度随中底刚度的增加而增加(6.26 N·m/rad~37.60 N·m/rad)[39],可以说明在鞋具 LBS 增加时,跖趾关节的屈伸活动度减小。

在跖趾关节做正功峰值时刻,LBS 较高鞋具的跖趾关节跖屈力矩更高,与本次研究结果相吻合。但有研究发现跖趾关节跖屈角度减小会增大其他关节的活动来代偿跖趾关节的运动[22]。研究表明,随着鞋具 LBS 上升,穿着低刚度鞋具时跖趾关节做正功无明显差异,但高刚度鞋具踝关节正功随刚度上升而增加。这说明在鞋具 LBS 改变时,部分关节可能会出现代偿性调整以补偿跖趾关节的能量缺失。研究结果显示,青少年跑者可能难以驱动高 LBS 鞋具,且跑鞋 LBS 增加也可能导致踝关节代偿和跟腱负荷增大。结合研究结果分析,鞋具的 LBS 还需在一定范围内限制跖趾关节的峰值力矩,以取得更好的运动表现,并降低相应的运动损伤风险。

本研究仅针对 3 种不同 LBS 跑鞋进行研究,可能存在一定局限性。未来实验设计可选取更多梯度变化 LBS,将下肢关节不同运动平面的运动学与动力学参数考虑在内,量化分析适宜青少年跑者的跑鞋 LBS 范围,提高青少年跑者运动表现,降低跑步运动损伤风险。



## 4 结　论

随着跑鞋 LBS 增加,青少年跑者的伸髋角度和峰值力矩减小,髋关节做功降低。踝关节跖屈角度减小伴随做功增大,跖趾关节屈曲活动度和峰值力矩减小。研究结果显示恒定跑速下,跑者穿着不同 LBS 鞋具的下肢关节做功总量无显著差异,但在不同 LBS 条件下出现了下肢关节做功的重新分布。研究推测跑鞋 LBS 在 5.0 N・m ~ 6.3 N・m 之间可能存在有利于青少年跑者跑步表现的 LBS 范围。相关研究结果可为青少年跑鞋在 LBS 参数的选取与优化方面提供参考依据。

## 参考文献

[1] ORTEGA J A,HEALEY L A,SWINNEN W,et al. Energetics and biomechanics of running footwear with increased longitudinal bending stiffness: A narrative review[J]. Sports medicine, 2021, 51(5):873-894.

[2] FLORES N,DELATTRE N,BERTON E,et al. Effects of shoe energy return and bending stiffness on running economy and kinetics[J]. Footwear science,2017,9(S1):S11-S13.

[3] MADDEN R,SAKAGUCHI M,TOMARAS E K,et al. Forefoot bending stiffness, running economy and kinematics during overground running[J]. Footwear science,2016,8(2):91-98.

[4] MOORE I S,JONES A M,DIXON S. Reduced oxygen cost of running is related to alignment of the resultant GRF and leg axis vector:A pilot study[J]. Scandinavian journal of medicine & science in sports,2016,26(7):809-815.

[5] WILLWACHER S,KÖNIG M,BRAUNSTEIN B,et al. The gearing function of running shoe longitudinal bending stiffness[J]. Gait & posture,2014,40(3):386-390.

[6] HOOGKAMER W,KIPP S,FRANK J H,et al. A comparison of the energetic cost of running in marathon racing shoes[J]. Sports medicine,2018,48(4):1009-1019.

[7] STEFANYSHYN D J, WANNOP J W. The influence of forefoot bending stiffness of footwear on athletic injury and performance [J]. Footwear science,2016,8(2):51-63.

[8] FULLER J T,BELLENGER C R,THEWLIS D,et al. The effect of footwear on running performance and running economy in distance runners[J]. Sports medicine,2015,45(3):411-422.

[9] BELTRAN R T. The influence of footwear longitudinal bending stiffness on running economy and biomechanics in older runners [D]. Memphis:The University of Memphis,2021.

[10] NUDEL D B,HASSETT I,GURIAN A,et al. Young long distance runners:Physiological and psychological characteristics[J]. Clinical pediatrics,1989,28(11):500-505.

[11] XU G,LIU H,ZHANG L,et al. Influence of taekwondo competition on cortical thickness in the calcaneus and stress distribution in the trabecular bone[J]. Chinese journal of tissue engineering research, 2021,25(35):5582.

[12] KONG P W,DE HEER H. Anthropometric,gait and strength characteristics of Kenyan distance runners[J]. Journal of sports science & medicine,2008,7(4):499.

[13] ORTEGA F B,RUIZ J R,CASTILLO M J,et al. Physical fitness in childhood and adolescence:A powerful marker of health[J]. International journal of obesity,2008,32(1):1-11.

[14] JIA S-W,LAM W-K,HUANG Z,et al. Influence of metatarsophalangeal joint stiffness on take-off performances and lower-limb biomechanics in jumpmanoeuvres [J]. Journal of sports sciences, 2022:1-8.

[15] NIGG B. Biomechanical considerations on barefoot movement and barefoot shoe concepts[J]. Footwear science,2009,1(2):73-79.

[16] 梅齐昌,顾耀东,李建设. 基于足部形态特征的跑步生物力学分析[J]. 体育科学,2015,35(6):34-40. (MEI Qichang,GU Yaodong,LI Jianshe. Biomechanical analysis of running based on foot morphological characteristics[J]. Sports science,2015,35(6):34-40 (in Chinese)).

[17] FAUL F,ERDFELDER E,LANG A-G,et al. G* Power 3:A flexible statistical power analysis program for the social,behavioral,and biomedical sciences[J]. Behavior research methods,2007,39(2):175-191.

[18] TRAIPERM N,GATTERER H,WILLE M,et al. Cardiac troponins in young marathon runners[J]. The American journal of cardiology,2012,110(4):594-598.

[19] 顾耀东,孙冬,FEKETE G,等. "裸足"运动方式对下肢生物力学功能调整的研究进展[J]. 中国体育科技,2019,55(1):61-

74.(GU Yaodong,SUN Dong,FEKETE G,et al. Research progress on the adjustment of lower extremity biomechanical function by "barefoot" exercise[J]. China sports science and technology, 2019,55(1):61-74 (in Chinese)).

[20] 顾耀东,孙冬,梅齐昌. 大数据和人工智能背景下运动鞋生物力学研发思路及启示[J]. 上海体育学院学报,2021,45(2):64.(GU Yaodong,SUN Dong,MEI Qichang. The idea and enlightenment of biomechanics research and development of sports shoes under the background of big data and artificial intelligence[J]. Journal of Shanghai Institute of Physical Education,2021,45(2):64(in Chinese)).

[21] 梅齐昌,高自翔,FERNANDEZ J,等. 基于统计形状模型的三维足形状建模[J]. 医用生物力学,2021,36(1):96-101.(MEI Qichang,GAO Zixiang,FERNANDEZ J,et al. Three-dimensional foot shape modeling based on statistical shape model[J]. Medical biomechanics,2021,36(1):96-101 (in Chinese)).

[22] 刘钦华,赵功赫,初心,等. 儿童鞋中后底硬度对跑步过程中下肢生物力学影响[J]. 皮革科学与工程,2021,31(6):53-58.(LIU Qinhua,ZHAO Gonghe,CHU Xin,et al. Effects of midsole hardness of children's shoes on biomechanics of lower limbs during running[J]. Leather science and engineering,2021,31(6):53-58 (in Chinese)).

[23] 顾耀东,李建设. 有限元分析在步态生物力学研究中的应用进展[J]. 北京体育大学学报,2007(8):1080-1082.(GU Yaodong,LI Jianshe. Application progress of finite element analysis in gait biomechanics research[J]. Journal of Beijing Sport University, 2007(8):1080-1082 (in Chinese)).

[24] ISHERWOOD J,WANG H,STERZING T. Running biomechanics and running shoe perception of Chinese men and women[J]. Footwear science,2021,13(1):55-67.

[25] ČOH M,MILANOVIĆ D,KAMPMILLER T. Morphologic and kinematic characteristics of elite sprinters[J]. Collegium antropologicum,2001,25(2):605-610.

[26] 郝琦,李建设,顾耀东. 裸足与着鞋下跑步生物力学及损伤特征的研究现状[J]. 体育科学,2012,32(7):91-97.(HAO Qi,LI Jianshe,GU Yaodong. Research status of biomechanics and injury characteristics of barefoot and running with shoes[J]. Sports science,2012,32(7):91-97 (in Chinese)).

[27] 李建设,顾耀东,陆毅琛,等. 运动鞋核心技术的生物力学研究[J]. 体育科学,2009,29(5):40-48.(LI Jianshe,GU Yaodong, LU Yichen,et al. Biomechanical research on core technology of sports shoes[J]. Sports science,2009,29(5):40-48 (in Chinese)).

[28] XU D,CEN X,WANG M,et al. Temporal kinematic differences between forward and backward jump-landing[J]. International journal of environmental research and public health,2020,17(18):6669.

[29] COLLINS T D,GHOUSSAYNI S N,EWINS D J,et al. A six degrees-of-freedom marker set for gait analysis:repeatability and comparison with a modified Helen Hayes set[J]. Gait & posture,2009, 30(2):173-180.

[30] 秦菲菲,赵韩,黄康,等. 基于 UK 理论 的下肢关节力矩分析方法[J]. 应用力学学报,2020,37(5):2141-2145.(QIN Feifei, ZHAO Han,HUANG Kang,et al. Analysis method of lower limb joint torque based on UK theory[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(5):2141-2145 (in Chinese)).

[31] 李蜀东,顾耀东. 足前掌在不同着地角度下跖骨应力状态的有限元研究[J]. 体育科学,2018,38(3):67-72.(LI Shudong,GU Yaodong. Finite element study on the stress state of the metatarsal bones under different landing angles of the forefoot[J]. Sports science,2018,38(3):67-72 (in Chinese)).

[32] 王俊清,张希妮,罗震,等. 步频再训练对跑步时下肢冲击的生物力学影响研究[J]. 应用力学学报,2020,37(5):2167-2175.(WANG Junqing,ZHANG Xini,LUO Zhen,et al. Biomechanical effects of cadence retraining on lower limb impact during running [J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(5):2167-2175(in Chinese)).

[33] CIGOJA S,FIRMINGER C R,ASMUSSEN M J,et al. Does increased midsole bending stiffness of sport shoes redistribute lower limb joint work during running? [J]. Journal of science and medicine in sport,2019,22(11):1272-1277.

[34] DAY E M. The influence of altering internal and external factors contributing to metatarsophalangeal joint mechanics and their effects on running economy [D]. Euggene:University of Oregon, 2019.

[35] HILLSTROM H J,BUCKLAND M A,SLEVIN C M,et al. Effect of shoe flexibility on plantar loading in children learning to walk[J]. Journal of the American Podiatric Medical Association,2013,103 (4):297-305.

[36] 宋雅伟,滕津汝,张曦元. 不同硬度鞋底对下肢步行运动学的影响[J]. 医用生物力学,2013,28(4):388-396.(SONG Yawei, TENG Jinru,ZHANG Xiyuan. Effects of different hardness soles on walking kinematics of lower limbs[J]. Medical biomechanics, 2013,28(4):388-396 (in Chinese)).

[37] 万祥林,曲峰. 运动鞋屈曲刚度对舒适性及短跑表现的影响[J]. 体育科学,2013,33(12):59-64.(WAN Xianglin,QU Feng. Effects of flexural stiffness of sports shoes on comfort and sprint performance[J]. Sports science,2013,33(12):59-64 (in Chinese)).

[38] STEFANYSHYN D J,NIGG B M. Influence of midsole bending stiffness on joint energy and jump height performance[J]. Medicine and science in sports and exercise,2000,32(2):471-476.

[39] OH K,PARK S. The bending stiffness of shoes is beneficial to running energetics if it does not disturb the natural MTP joint flexion [J]. Journal of biomechanics,2017,53:127-135.

(编辑　黄崇亚)